

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

(VISZKO)ELASZTIKUS TESTEK SZÁRAZ ÉS KENT CSÚSZÓ ÉRINTKEZÉSÉNEK NUMERIKUS MODELLEZÉSE

Írta:

Goda Tibor János

aki a Magyar Tudományos Akadémia doktora
cím elnyerésére pályázik

Budapest, 2016

1. Bevezetés

A súrlódás jelenségének kutatása, okainak és következményeinek megértése alapvető fontosságú a gépészeti tudományok területén [1-6]. A kísérleti eszközök, az elméletek, a modellezési módszerek és a modellek folyamatos fejlődésének köszönhetően egyfelől egyre több lehetőség nyílik a súrlódással kapcsolatos jelenségek megismerésére és megértésére, másfelől a témával foglalkozó szakembereknek/kutatóknak folyamatosan újabb és újabb kihívásokkal kell szembesülniük. Például a felületek minőségével és érdekességével kapcsolatos megfigyeléseink eredményét döntően befolyásolja a nagyítás mértéke, amely mellett a felületet szemléljük (lásd [2]), és a mérések (mérési módszer, mérőeszköz) pontossága. A felületi érdekességet, ennek megfelelően, mikro- és nano-szinten is értelmezhetjük. A tribológia, mint a testek érintkezésével, száraz és kent súrlódásával, valamint kopásával foglalkozó tudomány, alapvetően kísérlet orientált, azonban a számítógéppel támogatott tribológiai kutatások, azaz a numerikus tribológia évtizedek óta tartó intenzív fejlődése és folyamatos térnyerése megkérdőjelezhetetlen. A kísérleti vizsgálatok mellett egyre gyakrabban találkozhatunk numerikus módszerekre épülő modellekkel (lásd [8, 9]), melyek fő célja a súrlódás jelenségének alaposabb megismerése és a súrlódási erő várható nagyságának becslése/előrejelzése a súrlódás mögött rejlő fizikai folyamatok egyre pontosabb modellezésén keresztül. Léteznek tribológiai rendszerek, melyek modelljei bizonyítottan jól használhatóak, de a legtöbb esetben a modellek folyamatos fejlődéséről, illetve fejlesztéséről kell beszélni. Ugyanakkor ismerünk olyan jelenségeket is (pl. határsúrlódás jelensége), melyeknél már a modellezhetőség is igen kétséges a jelenségre hatással lévő paraméterek nagy száma miatt.

2. Az értekezés témájának tudományos és gyakorlati jelentősége

Napjainkban, a számítógép a mérnöki munka mindennapi kelléke, így a kutatás-fejlesztési tevékenység során összegyűjtött ismeretek sokszor kereskedelmi forgalomban kapható, általános célú szoftverekkel létrehozott modellek, vagy önálló, saját fejlesztésű számítógépes programok, numerikus eszközök formájában öltenek testet. Az ilyen numerikus eszközök jelentősége napjainkban folyamatosan nő, ugyanis a modellek amellet, hogy támogatják a mérnöki munkát, a szükséges kísérletek számának csökkentését és a kísérleti feltételek/körülmények meghatározását is elősegítik. Megfelelő modellek hiányában költség- és időigényes tribológiai kísérletekre van szükség az optimális anyagpár, konstrukciós kialakítás, felületi minőség, stb. meghatározásához, ami a termék piacra kerülési idejét hátrányosan befolyásolja. A különböző tribológiai szempontok tervezési fázisban történő érvényesítésével nemcsak a kísérleti vizsgálatok száma csökkenthető, hanem az adott termék tribológiai szempontú (kisebb súrlódás és kopás, hosszabb élettartam, stb.) optimalása is megvalósítható. A numerikus modellek kidolgozásánál komoly kihívást jelent a súrlódás jelensége mögött rejlő fizikai folyamatokhoz kapcsolható méret- (makro-, mikro-, nano-szint) és időtartományok egyidejű figyelembe vétele (többszintű modellezési megközelítés), és a jelenségek között fennálló kapcsolt viselkedés. A numerikus modellek előnye, többek között, a különböző fizikai folyamatok súrlódási erőre gyakorolt hatásának becslésében, valamint a súrlódási viselkedést befolyásoló paraméterek hatását feltáró érzékenység vizsgálatokban rejlik. A numerikus tribológia segítségével olyan eseteket is vizsgálhatunk, amelyeknek kísérleti vizsgálata nem, vagy csak nagyon költséges módon valósítható meg, miközben a különböző konstrukciós változatok összehasonlításának lehetőségéről sem kell lemondanunk. A legújabb tribológiai kutatásokban nemcsak kontinuum mechanikára (pl. végeselem módszer, véges differencia módszer) és diszkrét megközelítésre épülő numerikus módszerekkel (pl. diszkrét elem módszer, molekula dinamikai szimuláció) találkozhatunk,

hanem e módszerek összekapcsolására irányuló törekvésekkel is. Ezek fő célja olyan numerikus modellek kidolgozása és vizsgálata, melyek alkalmasak az atomi szinttől a tribológiai rendszer (az érintkező testek, a testeket tartalmazó mechanikai rendszer és az érintkező testeket elválasztó közeg vagy más néven harmadik test együttese) szintjéig terjedő igen széles mérettartomány egyidejű figyelembe vételére anélkül, hogy vizsgálatainkat nagyon rövid időtartományra kellene korlátoznunk. A numerikus tribológiával foglalkozó kutatói közösségen belül általánosan elfogadott vélekedés szerint, az elkövetkező évek kutatásait a több méret- és időtartományra kiterjedő, kapcsolt termo-mechanikai modellek kidolgozására irányuló erőfeszítések fogják meghatározni.

Az értekezés témája (viszko)elasztikus testek száraz és kent csúszó érintkezésének numerikus modellezése. A témához kapcsolódó kutatások gyakorlati jelentősége megkérdőjelezhetetlen a gépészmérnöki gyakorlatban használt gumiból, gumiszerű anyagból készült viszkoelasztikus súrlódó gépelemek (tömítések, görgők, szíjak, szállítószalagok, vezető elemek, stb.), a mindennapi életünk során nélkülözhetetlen viszkoelasztikus, súrlódási erő szempontjából kritikus szerkezeti elemek/testek (pl. gumiabroncs, cipőtalp, stb.) és a mérnöki gyakorlatban használt, viszkoelasztikus viselkedést mutató anyagok nagy száma miatt. Ahogy az alkalmazási példákból is látszik, a súrlódási erő nagysága hatással van az energiafogyasztásra, a káros anyag kibocsátásra, az emberi sérüléssel/halállal járó csúszással kapcsolatos balesetekre, a közlekedés biztonságra, a súrlódással kapcsolatos vezérlési és üzemeltetési problémákra, stb. Ennek megfelelően vannak esetek, amikor a kisebb, és vannak esetek, amikor a nagyobb súrlódási erő elérése a cél.

3. Az értekezés tartalma

Az értekezés a súrlódási erő viszkoelasztikus (histerézis eredetű) összetevőjének (lásd [3]) elemzésével és jellemzésével kezdődik. A gumi szerkezeti elem kemény, érdes ellenfelületen történő csúszása során az érdességcsúcsok ismétlődő igénybevételt okoznak a gumi egy viszonylag keskeny, felszínhez közeli rétegében (1. ábra). A gumiban a dinamikus terhelés hatására fellépő histerézist (felületi érdesség által generált energiavesztés) a súrlódási erő munkájának tekintve eljuthatunk a súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének értelmezéséhez. A szakirodalomban több tanulmány is foglalkozik a súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének kísérleti [1, 3, 4] és/vagy elméleti [2] úton történő meghatározásával, de szinte kizárólag csak a gumiabroncs/úttest érintkezési pár vonatkozásában. Ezek között mind analitikus, mind numerikus vizsgálatok találhatók. Mofidi és társai [5] tanulmánya a korábban nem vizsgált, látszólag sima felületek által generált histerézis eredetű súrlódási erőre koncentrált, miközben azt hangsúlyozza, hogy a méréssel meghatározott 0,48...0,66 közötti látszólagos súrlódási tényezők a súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének dominanciájával magyarázhatók.

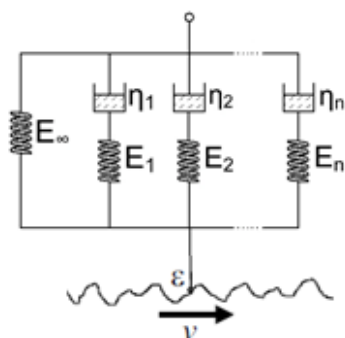
Az értekezés szerzőjének témával kapcsolatos publikációinak megjelenését megelőzően a súrlódási erő felületi érdesség által generált viszkoelasztikus összetevőjének végeselem módszer alkalmazására épülő becslésével foglalkozó szakirodalma mindössze néhány tanulmányból állt. Ezen tanulmányok szerzői egyetlen érdességcsúcs, illetve szinuszos felület által generált histerézis eredetű súrlódási erő nagyságának meghatározásával foglalkoztak, amihez nagyon egyszerű viszkoelasztikus anyagmodellre (Standard-solid modell) épülő 2D-s végeselemes modelleket dolgoztak ki. Ebből adódóan, ezek a modellek csak a súrlódási erő minőségi vizsgálatára voltak alkalmasak. Az értekezésben, az egymáson elcsúszó testek makro és mikro geometriája (felületi érdessége) által generált viszkoelasztikus súrlódás modellezési lehetőségeinek áttekintését követően, PhD hallgatókkal közösen kidolgozott ([16, 17]) 2D/3D-s modellek kerülnek bemutatásra a jelenség végeselemes modellezhetőségének demonstrálására. A modellek a felületi érdesség figyelembe vételére többféle, míg a gumi és gumi-szerű anyagból készült testek idő- és hőmérsékletfüggő anyagi

viselkedésének leírására fenomenológiai megközelítést használnak. A szimulációk nagy része a TRW Automotive (Pamplona, Spanyolország) kétkörös főfékhengereihez kapcsolódik, ahol a látszólag sima, alternáló mozgást végző bűvárdugattyúk (elsődleges és másodlagos) EPDM gumi tömítéseken csúsznak fékfolyadék jelenlétében. A súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének vizsgálata szakirodalomból vett mérési eredmények elemzésével és összehasonlításával zárul. Az értekezés első tézise, ennek megfelelően, látszólag sima, merev felületek kent gumi ellenfelületen történő csúszása során fellépő súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének mennyiségi becslésével kapcsolatos. A tézispont jelentőségét az adja, hogy szemben az úttest/gumiabroncs kapcsolattal foglalkozó szakirodalmi kutatásokkal, a gépészmérnöki gyakorlat szempontjából fontos (pl. súrlódó tömítések), látszólag sima felületek által generált viszkoelasztikus súrlódási erő összetevő nagyságának mennyiségi becslésére koncentrált. (A súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének végeselemes modellezése során használt anyagmodell viszkoplasztikus anyagi viselkedésre történő kiterjesztésével az értekezés szerzőjének témavezetése mellett készült PhD értekezés (lásd [18]) foglalkozik.)

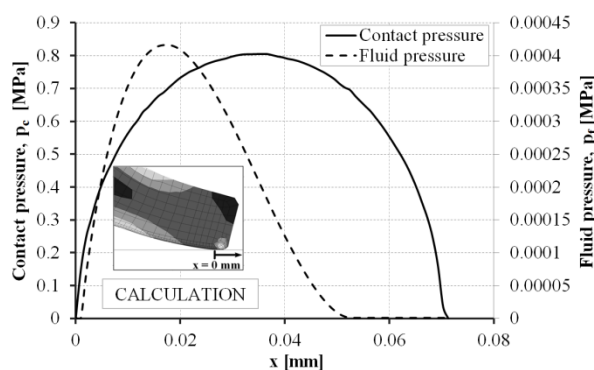
Az értekezés második része csúszó gumi szerkezeti elemek (hidraulikus dugattyúrúd tömítés, ablaktörlő lapát) vegyes súrlódási állapotának numerikus modellezésével foglalkozik. Első lépésként két, gyakran használt, érdes sík felület súrlódásmentes érintkezésének vizsgálatára kidolgozott modell bemutatására és jellemzésére kerül sor. Lágy elasztomer és kemény ellenfelület érintkezése során fellépő érdességcsúcs típusú érintkezés modellezésére a szakirodalomban több elmélet is található, azonban ezek egyike sem tekinthető általánosan elfogadottnak. Leggyakrabban a Greenwood-Williamson-féle [7] érintkezési elméletet alkalmazzák, azonban az ezredforduló elején publikált Persson-féle [2, 6] érintkezési elmélet használatára is találhatunk nem egy példát. Persson több tanulmányában is hangsúlyozza a Greenwood-Williamson-féle elmélet gyengeségeit és a két elmélet által szolgáltatott eredmények közötti igen jelentős eltérést, de annak nagyságát (pl. a névleges kenőfilm vastagság számítása szempontjából kulcsfontosságú érintkező érdes felületek középfelületei közötti távolságra vonatkozóan) nem számszerűsíti. Ennél a pontnál azonban meg kell említeni, hogy az eredmények közvetlen összehasonlítását igencsak megnehezíti az a tény, hogy az érdes felületek jellemzésére a két elmélet eltérő paramétereket használ. Az érintkezésen belül, a modellek merev sík felülettel érintkező elasztomer lapra történő alkalmazását a különböző nagyságú névleges érintkezési nyomás mellett számítható, az érdes felületek középsíkjai között értelmezett távolságok összehasonlítása követi. A modellek által szolgáltatott becslések mennyiségi összehasonlításából származó eredmény adja az értekezés második tézisé. Következő lépésként Salant és szerzőtársai [8], eredetileg hidraulikus dugattyúrúd tömítésekre kidolgozott, 1D-s, állandósult állapotbeli vegyes súrlódási modelljének és egy erre épülő - az értekezés szerzője által kifejlesztett és verifikált - számítógépes program bemutatására kerül sor. Ez utóbbi az érintkező érdes felületek középfelületei közötti távolság, a kenőfilmben kialakuló nyomás, az érdességcsúcs-típusú érintkezési nyomás, a szivárgás és a várható súrlódási erő nagyságának becslésére is alkalmas. Az elmúlt évtizedben a hidraulikus dugattyúrúd tömítések vegyes súrlódási állapotának modellezésével kapcsolatos kutatások új lendületet kaptak. Ennek köszönhetően látott napvilágot Salant és szerzőtársai [8] állandósult állapotbeli numerikus modellje. Szemben számos korábban publikált, elasztohidrodinamikai kenésállapotot és ideálisan sima érintkező felületeket feltételező tanulmánnyal, a szerzőknek, a korábbi kutatások eredményeit felhasználva, sikerült egy olyan modellt készíteni, ami a felületi érdesség, a kavitáció, a nyomásfüggő viszkozitás mellett a rugalmas deformációk hatását is figyelembe veszi. Ugyanakkor azt is érdemes megemlíteni, hogy miközben a hidraulikus dugattyúrúd tömítések vegyes súrlódási állapotának modellezése igen intenzíven kutatott területnek számít, addig a megfelelő numerikus modellek pl. ablaktörlő lapátra történő adaptálásával csak elvétve

találkozhatunk a szakirodalomban. Jóllehet a szakirodalomban találhatók ablaktörlő lapát tribológiájával foglalkozó tanulmányok (lásd [9, 10, 11]) csak néhány szerző tesz kísérletet a valós ablaktörlő lapát törlőél geometria tribológiai viselkedésre gyakorolt hatásának elméleti/kísérleti vizsgálatára. Bódai és Goda [S2, S17] munkái mellett csak egy-két tanulmány (pl. Persson és Scaraggi [9] tanulmánya, ami az ablaktörlő lapát meghajlott törlőélét hengerrel közelíti) foglalkozik a törlőél vegyes súrlódási állapotának modellezésével. A szakirodalmat uraló próbatest-szintű, illetve a törlőél kis darabjának használatára épülő kísérleti vizsgálatok mellett, Bódai és Goda [S3] tanulmányának köszönhetően, már teljes ablaktörlő lapátra vonatkozó kísérleti eredmények is találhatók a szakirodalomban. Az értekezés második részét a kifejlesztett számítógépes program alkalmazása zárja, melynek keretében egy hidraulikus O-gyűrű és egy kereskedelmi forgalomban kapható ablaktörlő lapát vegyes súrlódási állapotának modellezésére kerül sor (2. ábra). A Salant és szerzőtársai [8] által kidolgozott numerikus modell megvalósításával és alkalmazásával elért új tudományos eredményeket a harmadik és a negyedik tétel foglalja össze. (Az értekezés szerzőjének, további, ablaktörlő lapáttal kapcsolatos kutatási tevékenységébe a témavezetése mellett készült PhD dolgozat (lásd [19]) nyújt betekintést.)

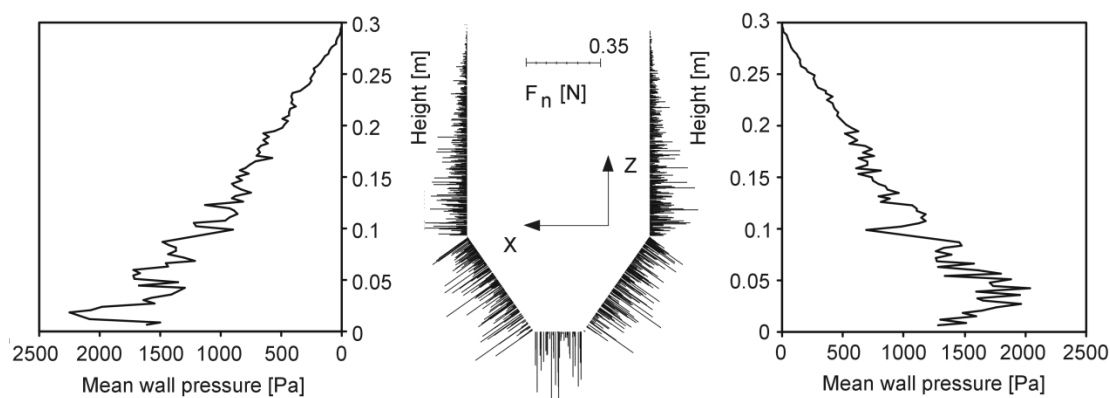
Az értekezés utolsó, harmadik része viszkoelasztikus szemcsékből álló anyag tárolására használt, nem tengelyszimmetrikus silók/tölcsérek falaira ható szerkezetszintű erők (normális és súrlódási erők) numerikus becslésével foglalkozik, miközben a kontinuum mechanikára épülő modellezési megközelítés helyett a numerikus tribológiában (is) egyre gyakrabban használt diszkrét modellezési megközelítésre helyezi a hangsúlyt. Ennek értelmében a falakra ható szerkezetszintű súrlódási erő meghatározása (származtatása) szemcsék szintjén definiált egyszerű érintkezési modellek alkalmazásával történik. A szemcsés anyagok tárolására használt silók/tölcsérek tervezéséhez a tervezőnek ismernie kell, többek között, a töltési és az ürítési folyamat során fellépő falakra ható nyomás és súrlódási erő nagyságát is. Goda és Ebert [S4] tanulmányának megjelenése előtt publikált, silók és tölcsérek töltésének és ürítésének modellezésével foglalkozó 3D-s diszkrét elemes szimulációk (lásd [13-15]) mindegyike tengelyszimmetrikus geometriával, viszonylag kevés szemcsével és kereskedelmi program felhasználásával készült, miközben elsősorban az áramlási viszonyok, az ürítési sebesség, valamint a szemcsék között kialakuló erőfolyam vizsgálatára koncentráltak. A diszkrét modellezési megközelítésnek megfelelően, az értekezés utolsó része Cundall és Strack [12] egymásba hatoló merev gömb alakú részecskéket használó diszkrét elem módszerének rövid bemutatásával indul, amit a diszkrét modellezési megközelítést alkalmazó tribológiai kutatások rövid ismertetése követ. Ezek után kerül sor a szerző, Cundall és Strack modellje alapján kifejlesztett, számítási algoritmusának és az azt megvalósító szimulációs programjának rövid bemutatására. A szimulációs program önálló grafikus felhasználói felülettel rendelkezik és alkalmas a modellezési folyamat valamennyi fázisának elvégzésére, így a 3D-s diszkrét elem modell felépítésére, grafikus megjelenítésére, megoldására és a számítási eredmények kiértékelésére/megjelenítésére/tárolására. A program forráskódja tetszőlegesen bővíthető/módosítható, ami ideális eszközzé teszi diszkrét modellezési megközelítésre épülő szimulációk/vizsgálatok elvégzésére akár önálló eszközként, akár más numerikus módszerrel együtt (pl. kapcsolt diszkrét elem/végeselem módszer) alkalmazva. Az értekezés a szimulációs program alkalmazásával zárul, melynek keretében négyzet keresztmetszetű, de különböző geometriai kialakítású silók/tölcsérek falaira a töltési folyamat végén és a transziens ürítési folyamat során ható terhelések (3. ábra) meghatározására kerül sor, különös tekintettel a statikus állapotban kialakuló, súrlódás következtében fellépő falterhelésekre. A falakra ható súrlódási erő diszkrét modellezési megközelítésre épülő meghatározásához kapcsolódó új tudományos eredményt az ötödik tétel tartalmazza.



1. ábra. A súrlódási erő felületi érdesség által generált viszkoelasztikus összetevőjének becslésére használt modell sematikus ábrája



2. ábra. Merev felületen csúszó, kereskedelmi forgalomban kapható ablaktörlő lapát törlőélére számítással meghatározott érdességcsúcs-típusú érintkezési nyomás és kenőfilmben kialakuló nyomás névleges érintkezési tartományon belüli változása [S2]



3. ábra. Szemcse/fal érintkezés következtében fellépő normális irányú erők és az ezekből számítható nyomáeloszlások [S4]

4. Kapcsolódó numerikus módszerek és főbb kutatási pályázatok

A szerző, súrlódási erő viszkoelasztikus (hiszterézis eredetű) összetevőjének végeselemes becsléséhez kapcsolódó kutatási eredményeinek bemutatására, kezdetben a szerző részvételével, majd később témavezetésével megvalósított, az Európai Unió 6. Keretprogramja által támogatott KRISTAL (*Knowledge-based radical innovation surfacing for tribology and advanced lubrication*, www.cordis.europa.eu/project/rcn/75754_en.html) projekt, és a szerző MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíja keretében publikált tanulmányai alapján került sor.

Az értekezés második, csúszó elasztomer szerkezeti elemek vegyes súrlódási állapotának modellezésével foglalkozó részében bemutatásra kerülő szakirodalmi numerikus modell a végeselem módszer és a véges differencia módszer alkalmazására épül. A numerikus modell megvalósításának tekinthető számítógépes program fejlesztését, majd verifikálását, a már említett KRISTAL projekt és MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta.

Az értekezés harmadik, diszkrét elemes modellezéssel foglalkozó része a szerző saját fejlesztésű számítógépes programjának alkalmazásán alapszik. A 3D-s numerikus modell felépítésére, grafikus megjelenítésére, megoldására, valamint a számítási eredmények kiértékelésére, grafikus megjelenítésére és tárolására is használható számítógépes program fejlesztésére, illetve annak szemcsés anyaggal feltöltött silók/tölcsérek falára ható súrlódási erő és nyomás meghatározására irányuló alkalmazására a Német Kutatási Alap (Deutsche

Forschungsgemeinschaft, röviden DFG) által támogatott „*Numerische Simulation technischer Partikelsysteme auf Hochleistungsrechnern*” pályázat keretében került sor.

5. Eredmények hasznosítása

Az értekezésben összefoglalt kutatómunka a numerikus tribológia súrlódási erő nagyságát számítással/modellezéssel történő meghatározását célzó kutatásaihoz tartozik. Jóllehet a súrlódási erő nagyságát kísérleti úton szokás meghatározni, a súrlódási erő nagyságának számítással/modellezéssel történő becslésére, ezáltal a súrlódás okainak és következményeinek feltárására, irányuló kutatások jelentősége folyamatosan nő. A viszkoelasztikus testek/szerkezeti elemek/gépelemek száraz és kent csúszó súrlódásának vizsgálatából származó eredmények hasznosítására számos lehetőség kínálkozik. A megszerzett ismeretek közvetlenül felhasználhatók, többek között, a gépjárművek, motorkerékpárok, kerékpárok, mezőgazdasági gépek, stb. gumiabroncsainak fejlesztésénél; a mindennapi használatra szánt és a munkavédelmi célú lábbelik talprészének tervezésénél; az ablaktörlő lapátok törlőélének továbbfejlesztésénél; a tömítések, gumi bevonatú kerekek, szíjak, hevederek, stb. tervezésénél/fejlesztésénél. Így a témával kapcsolatos kutatási eredmények közvetett módon hatással vannak, többek között, az energia felhasználásra, az üzemanyag fogyasztásra, a CO₂ kibocsátásra, a sérülést/halált okozó, megcsúszásra visszavezethető balesetekre, a közlekedés biztonságra, a súrlódással kapcsolatos vezérlési/szabályozási problémákra, a szükséges kenőanyag mennyiségére, stb.

Az értekezés súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének becsléséhez és kísérleti vizsgálatához tartozó eredményei segítséget nyújtanak

- (a) Amontons száraz, látszólag sima fémfelületek csúszó súrlódásának kísérleti vizsgálata során felfedezett súrlódási törvényéhez hasonló, gumi-szerű anyagból készült, érdes/látszólag sima, kemény ellenfelületen csúszó szerkezeti elemekre érvényes súrlódási törvény kidolgozásához; (Jóllehet a szakirodalomban található erre irányuló próbálkozások, a megoldás még várat magára.)
- (b) a szakirodalom súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének mennyiségi becslésére kidolgozott modelljeinek továbbfejlesztéséhez/pontosításához;
- (c) a súrlódási erő nagyságát befolyásoló jelenségek megértéséhez;
- (d) egy adott szerkezeti elem működése során fellépő súrlódási erő viszkoelasztikus összetevőjének tervezési fázisban történő pontos meghatározásához;
- (e) a csúszó, viszkoelasztikus szerkezeti elemek/gépelemek tervezéséhez;
- (f) a súrlódási erő mögött rejlő további jelenségek azonosításához és jelentőségük számszerűsítéséhez;
- (g) és a várható súrlódási erő tervezéséhez.

Az értekezés a szakirodalom két, széles körben használt, érdes felületek érintkezését leíró modelljének összehasonlításával foglalkozó részében közölt eredmények gyakorlati haszna kettős: egyrészt hozzájárulnak az elméletek jövőbeli pontosításához/továbbfejlesztéséhez, másrészt felhívják a kutatói közösség figyelmét a modellek validálásának szükségességére.

A gépészeti szerkezetekben igen nagy számban alkalmazott hidraulikus dugattyúrúd tömítésekkel szemben támasztott követelmények között a súrlódási erő és a szivárgás lehető legkisebb értéken tartása is szerepel. Ezek a tömítések azonban igen gyakran vegyes súrlódási állapotban üzemelnek. Az értekezésben bemutatott korszerű, vegyes súrlódási állapotot leíró szakirodalmi modell alapján az értekezés szerzője által kifejlesztett számítógépes program, valamint annak O-gyűrűre és kereskedelmi forgalomban kapható ablaktörlő lapátra történő alkalmazása, többek között, hozzájárul

- (a) az alternáló tömítések és más csúszó súrlódásnak kitett szerkezeti elemek tribológiai szempontokat is figyelembe vevő tervezésének kialakulásához;

- (b) a kisebb - ideális esetben zérus nagyságú - szivárgással jellemezhető tömítések kifejlesztéséhez;
- (c) az energiatakarékos tömítések/csúszó szerkezeti elemek kifejlesztéséhez;
- (d) a létező ablaktörlő lapát törlőél geometriák összehasonlításán keresztül új törlőél geometria kifejlesztéséhez, valamint a törlő hatás jobb megértéséhez.

Ezen kívül a modell bővítésével a törlőél öregedésének, a környezeti hőmérsékletnek, a törlőélen alkalmazott bevonatoknak és a törlőél kopásának/károsodásának kenésállapotra gyakorolt hatása is vizsgálható. Továbbá a kifejlesztett számítógépes program lehetőséget teremt már létező és még csak fejlesztési fázisban lévő tömítések vizsgálatára, a várható szivárgás mennyiségi becslésére, a tömítések szempontjából kritikus alacsony hőmérsékletek tribológiai viselkedésre gyakorolt hatásának vizsgálatára, a prototípusok és az időigényes és költséges mérések számának csökkentésére. Végezetül, a program továbbfejlesztésével a csúszási sebesség löket során bekövetkező változását, a tömítés időfüggő anyagi viselkedését, a kopás hatását, stb. is figyelembe lehet venni, miközben az alkalmazott modellezési megközelítés forgó tengelyeknél használt radiális tömítésekre történő kiterjesztésének lehetősége is megmarad.

A szemcsés anyagok tárolására használt silók/tölcsérek tervezése napjainkban a tervezők tapasztalatára, az üzemelési tapasztalatokra, az analitikus mechanika módszereinek alkalmazására, valamint a végeelem módszer használatára épül. Az értekezésben közölt eredmények azt bizonyítják, hogy az említett tervezést/fejlesztést támogató módszerek/gyakorlatok kiegészíthetők a diszkrét elemes modellezéssel. Ezen kívül az értekezés szerzője által kifejlesztett, 3D-s, diszkrét modellezési megközelítést alkalmazó szimulációs szoftver kontinuum mechanikára épülő numerikus módszerrel történő kombinálása lehetőséget teremt időben és térben többléptékű (multi-scale) numerikus modellek kidolgozására és megoldására is. Sőt, a forráskód kisebb módosításával, a szoftver alkalmassá tehető molekula dinamikai szimulációk, kopás szimulációk, anyagtudományhoz, törésmechanikához, szemcsés anyagok reológiájához, talajmechanikához kapcsolódó kutatások támogatására is.

Az eredmények gyakorlati hasznának tárgyalásánál nem szabad megfeledkezni azok oktatásban (MSc/PhD képzés) történő hasznosításának lehetőségéről sem. A kifejlesztett önálló, azaz további számítógépes alkalmazást (pl. matematikai szoftver, grafikus megjelenítést végző szoftver, stb.) nem igénylő szimulációs eszközök (a csúszó gumi elemek vegyes súrlódási állapotának modellezésére kidolgozott és a 3D-s diszkrét elem módszerre épülő általános célú szimulációs program) ugyanis közvetlenül alkalmazhatók oktatási/kutatási célokra (különböző 3D-s mérnöki problémák diszkrét elemes modellezése, kapcsolt végeelemes/ diszkrét elemes analízisek megvalósítása, kereskedelmi programok képességei által nem korlátozott kutatómunka, érzékenységvizsgálatok elvégzése, stb.). Végül, de nem utolsósorban elkerülhetjük a kereskedelmi diszkrét elemes programok éves szinten több millió forintos bérleti díjának megfizetését, nem is beszélve a szoftverek megvásárlásának tetemes költségeiről.

6. Új tudományos eredmények

1. Tézis

A súrlódási erő felületi érdesség által EPDM és NBR gumiban generált viszkoelasztikus összetevőjének (mikro-hiszterézisből származó súrlódási erő) numerikus és kísérleti vizsgálata során kimutattam, hogy mikro-hiszterézis eredetű súrlódási erő látszólag sima, kent felületek esetén is fellép, de ennek nagysága nem lehet olyan nagy, mint ahogy Mofidi és szerzőtársai [5] állítják, ([5] olajjal kent NBR gumin csúszó, látszólag sima (RMS érdesség $\approx 0,1 \mu\text{m}$) acél ellenfelületre vonatkozóan $\mu = 0,48 \dots 0,66$ nagyságú látszólagos súrlódási tényezőket közöl, melyek a szerzők állítása szerint a mikro-hiszterézis dominanciájával magyarázhatók.) mert sem a végeselemes szimulációk, sem az értekezésben bemutatott mérési eredmények nem igazolják mennyiségileg [5] eredményeit.

Tézishez közvetlenül kapcsolódó publikációk: [S1, S6, S8, S12]. További, tézis témájához kapcsolódó publikációk: [S5, S7, S9, S10, S11].

2. Tézis

A Greenwood-Williamson- [7] és a Persson-féle [2, 6, 9] érintkezési elméletet merev síkkal érintkező elasztomerre alkalmazva kimutattam, hogy az érdes felület középsíkjának a tökéletesen sima felülettől mért távolságának elméleti értékei közötti különbség, $1 \mu\text{m}$ -es RMS érdesség, valamint $0,1$ és 1 MPa közötti névleges érintkezési nyomás esetén, egy és négy nagyságrend között változik, de a különbség a névleges érintkezési nyomás csökkenésével folyamatosan csökken.

Tézishez közvetlenül kapcsolódó publikációk: [S3]

3. Tézis

Salant és szerzőtársai [8] állandósult állapotbeli, 1D-s, a kavitáció, a rugalmas deformáció, a felületi érdesség és a nyomásfüggő viszkozitás hatását egyidejűleg figyelembe vevő, eredetileg hidraulikus dugattyúrúd tömítésekre kidolgozott, vegyes súrlódási állapotot leíró modelljének O-gyűrűre ($8 \times 1,5 \text{ mm}$ (belső átmérő \times gyűrű vastagság), RMS érdesség = $0,4 \mu\text{m}$, rugalmassági modulus = 10 MPa , tömített nyomás = $0,6 \text{ MPa}$, behúzás/kitolás sebessége = 50 mm/s) történő alkalmazásán keresztül kimutattam, hogy kitolás esetén a névleges kenőfilm vastagság nagyobb, mint behúzás esetén; a névleges érintkezési tartományon belül a kitolás során kavitáció alakul ki, miközben a kenőfilmben kialakuló nyomás csúcsértéke a kavitáció mentes tartományon belül nem haladja meg a $0,76 \text{ MPa}$ -t; és a behúzás során nem lép fel kavitáció és a kenőfilmben kialakuló nyomás nem haladja meg a tömített nyomás értékét.

Tézishez közvetlenül kapcsolódó publikációk: [S15, S13]. További, tézis témájához kapcsolódó publikációk: [S16].

4. Tézis

Salant és szerzőtársai [8] vegyes súrlódási állapotot leíró modelljének kereskedelmi forgalomban kapható ablaktörlő lapát törlőélére (rugalmassági modulus = 4,5 MPa, RMS érdesség = 1 μm , csúszási sebesség = 150 mm/s) történő alkalmazásán keresztül kimutattam, hogy az érintkező testek középfelületei közötti rés a víz belépési pontjától távolodva először szűkül, majd tágul; a névleges érintkezési tartomány táguló részhez tartozó részén kavitáció alakul ki; az érdességcsúcs-típusú érintkezés következtében fellépő érintkezési nyomás legnagyobb értéke eléri a 0,8 MPa-t; és a kenőfilmben kialakuló nyomás csúcserőve három nagyságrenddel kisebb, mint az érdességcsúcs érintkezés következtében fellépő legnagyobb érintkezési nyomás.

Tézishez közvetlenül kapcsolódó publikációk: [S2]. További, tézis témájához kapcsolódó publikációk: [S17].

5. Tézis

Cundall és Strack [12] ideálisan merev, de az érintkezési pont környezetében egymásba hatoló gömböket alkalmazó háromdimenziós diszkrét elem módszere alapján általam kidolgozott számítógépes program alkalmazásával kimutattam, hogy négyzet keresztmetszetű (40000 azonos átmérőjű, viszkoelasztikus, gömb alakú cellulóz-acetát részecskét tartalmazó szemcsés anyaggal jó közelítéssel azonos magasságban feltöltött) tölcser, illetve alsó kialakításban eltérő silók esetén a ferde és függőleges falakon a töltési folyamat végén fellépő súrlódási erő nagysága $\mu = 0,3$ lokális, szemcse-szemcse és szemcse-fal súrlódási tényező és kísérletileg kalibrált érintkezési modell alkalmazása mellett a töltet súlyának 12...16%-a.

Tézishez közvetlenül kapcsolódó publikációk: [S4]. További, tézis témájához kapcsolódó publikációk: [S14].

7. A szerző értekezés témaköréhez kapcsolódó fontosabb publikációi

Folyóirat cikkek

- [S1] Goda T.J. Effect of track roughness generated micro-hysteresis on rubber friction in case of (apparently) smooth surfaces. *Tribology International*, Vol. 93, pp. 142-150 (2016), IF-es
- [S2] Bódai G., Goda T.J. Sliding friction of wiper blade: Measurement, FE modeling and mixed friction simulation. *Tribology International*, Vol. 70, pp. 63-74 (2014), IF-es
- [S3] Bódai G., Goda T.J. Friction force measurement at windscreen wiper/glass contact. *Tribology Letters*, Vol. 45, pp. 515-523 (2012), IF-es
- [S4] Goda T.J., Ebert F. Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. *Powder Technology*, Vol. 158 (1-3), pp. 58-68 (2005), IF-es
- [S5] Pálfi L., Goda T., Váradi K. Theoretical prediction of hysteretic rubber friction in ball on plate configuration by finite element method. *Express Polymer Letters*, Vol. 3 (11), pp. 713-723 (2009), IF-es
- [S6] Czifra Á., Goda T., Garbayo E. Surface characterisation by parameter-based technique, slicing method and PSD analysis. *Measurement*, Vol. 44 (5), pp. 906-916 (2011), IF-es
- [S7] Bódai G., Goda T. A new, tensile test-based parameter identification method for large-strain generalized Maxwell-model. *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 8 (5), pp. 89-108 (2011), IF-es
- [S8] Pálfi L., Goda T., Váradi K., Garbayo E., Bielsa J.M., Jiménez M.Á. FE prediction of hysteretic component of rubber friction. *Advances in Tribology*, pp. 1-12 (2012)
- [S9] Felhős D., Xu D., Schlarb A.K., Váradi K., Goda T. Viscoelastic characterization of an EPDM rubber and finite element simulation of its dry rolling friction. *Express Polymer Letters*, Vol. 2 (3), pp. 157-164 (2008)
- [S10] Soós E., Goda T. Numerical analysis of sliding friction behavior of rubber. *Materials Science Forum*, Vol. 537-538, pp. 615-621 (2007)
- [S11] Békési N., Goda T. A histerézis végeeselemes vizsgálata gumi és merev érdes ellenfelület csúszó súrlódása során. *Gép, LVII* (8-9), pp. 22-25 (2006)
- [S12] Pálfi L., Békési N., Goda T., Váradi K., Czifra Á. FE simulation of the hysteresis friction considering the surface topography. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 52 (2), pp. 83-91 (2008)
- [S13] Goda T., Bódai G. O-gyűrű szivárgás számítása korszerű numerikus módszerrel. *Gép, LX* (10-11), pp. 43-46 (2009)
- [S14] Goda T.J., Horváth S. Szemcsés anyagok sajátos tulajdonságainak modellezési lehetőségei. *Gép, LVI* (9-10), pp. 60-62 (2005)

Cikkek lektorált konferencia kiadványokban

- [S15] Goda T.J. Numerical prediction of friction, wear, heat generation and lubrication in case of sliding rubber components. In: Rudas I J, Fodor J, Kacprzyk J (Editors) *Towards Intelligent Engineering and Information Technology*. 736 p. Berlin ; Heidelberg: Springer, pp. 519-530. (Studies in Computational Intelligence; Vol. 243) ISBN: 3642037364; 978-3642037368 (2009)
- [S16] Goda T.J. Numerical modeling of lubrication in reciprocating hydraulic rod seals. *Gépészet 2008: Proceedings of Sixth Conference on Mechanical Engineering*. Budapest, 2008.05.29-2008.05.30., pp. 1-11. ISBN: 978-963-420-947-8 (2008)
- [S17] Bódai G., Goda T. Mixed friction of windscreen wiper: numerical analysis. *Gépészet 2012: Proceedings of the eighth international conference on mechanical engineering*. Budapest, 2012. pp. 22-28. ISBN: 978-963-313-055-1 (on CD)

8. Az értekezés témájához kapcsolódó legfontosabb szakirodalmi közlemények

- [1] Smith R.H. Analyzing friction in the design of rubber products and their paired surfaces. CRC Press, Taylor & Francis Group (2008)
- [2] Persson B.N.J. Theory of rubber friction and contact mechanics. *Journal of Chemical Physics*, Vol. 115 (8), pp. 3840-3861 (2001)
- [3] Grosch, K. The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 274 (1356), pp. 21-39 (1963)
- [4] Denny D.F. The influence of load and surface roughness on the friction of rubber-like materials. *Proc. Phys. Soc. B*, Vol. 66, pp. 721-727 (1953)
- [5] Mofidi M., Prakash B., Persson B.N.J., Albohr O. Rubber friction on (apparently) smooth lubricated surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 20, pp. 1-8 (2008)
- [6] Persson B.N.J. Relation between interfacial separation and load: a general theory of contact mechanics. *Physical Review Letters*, Vol. 99, pp. 1-4 (2007)
- [7] Greenwood J. A., Williamson J. B. P. Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 295, pp. 300-319 (1966)
- [8] Salant R., Maser N., Yang B. Numerical model of a reciprocating hydraulic rod seal. *Journal of Tribology*, Vol. 129, pp. 91-97 (2007)
- [9] Persson B.N.J., Scaraggi M. On the transition from boundary lubrication to hydrodynamic lubrication in soft contacts. *J. Phys. Condens. Matter.*, Vol. 21, pp. 1-22 (2009)
- [10] Koenen A., Sanon A. Tribological and vibroacoustic behaviour of a contact between rubber and glass (application to wiper blade). *Tribology International*, Vol. 40, pp. 1484-1491 (2007)
- [11] Deleau F., Mazuyer D., Koenen A. Sliding friction at elastomer/glass contact: Influence of the wetting conditions and instability analysis. *Tribology International*, Vol. 42, pp. 149-159 (2009)
- [12] Cundall P. A., Strack O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, Vol. 29 (1), pp. 47-65 (1979)
- [13] Langston P. A., Tüzün U., Heyes D. M. Discrete element simulation of granular flow in 2D and 3D hoppers: dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions. *Chemical Engineering Science*, Vol. 50 (6), pp. 967-987 (1995)
- [14] Zhu H.P., Yu A.B. Steady-state granular flow in a three-dimensional cylindrical hopper with flat bottom: microscopic analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, pp. 1497-1508 (2004)
- [15] Zhu H.P., Yu A.B. Steady-state granular flow in a 3D cylindrical hopper with flat bottom: macroscopic analysis. *Granular Matter*, Vol. 7, pp. 97-107 (2005)
- [16] Pálfi L.: A súrlódás hiszterézis komponensének végeselemes modellezése gumi-érdes felület csúszó pár esetén. PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2010)
- [17] Békési N. Elasztomer anyagok és csúszótömítések súrlódása és kopása. PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2011)
- [18] Soós E. Önmetsző csavarkötések fejlesztése. PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2012)
- [19] Bódai G. Material and frictional behavior of rubber sliding on glass surface, PhD Thesis, Budapest University of Technology and Economics (2012)